
OEA | 基于准连续域束缚态的高效硅基红外非线性上转换成像技术

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/41051.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

OEA | 基于准连续域束缚态的高效硅基红外非线性上转换成像技术。

Opto-Electronic Advances论文推荐南昌大学信息工程学院研究团队提出并验证了一种基于准连续域束缚态的硅基非线性超表面，实现了高效的红外上转换成像。该研究展示的非线性超表面具有完全的CMOS工艺兼容性，且基于成熟的SOI加工平台，具备大规模量产与集成的潜力。相比于传统的基于和频过程的成像方案，该方法仅需单束泵浦光即可实现THG转换，显著降低了系统的复杂性。

¹School of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China; ²Institute for Advanced Study, Nanchang University, Nanchang 330031, China; ³School of Physics and Materials Science, Nanchang University, Nanchang 330031, China; ⁴School of Education, Nanchang Institute of Science and Technology, Nanchang 330108, China; ⁵School of Optoelectronic Engineering, Guangdong Polytechnic Normal University, Guangzhou 510665, China.

*Correspondence: JM Qiu, E-mail: qiujuimin@email.ncu.edu.cn; QG Liu, E-mail: liuqiegen@ncu.edu.cn;

SY Xiao, E-mail: syxiao@ncu.edu.cn

文章 Liu TT, Qiu JM, Qin MB et al. High-efficiency infrared upconversion imaging with nonlinear silicon metasurfaces empowered by quasi-bound states in the continuum. Opto-Electron Adv 9, 250257 (2026).

第一作者：刘婷婷

通信作者：邱驹敏、刘且根、肖书源点

研究背景

红外成像技术利用目标物体的热辐射或特定大气窗口的穿透特性，在夜视、工业检测、生物医学及遥感等领域具有重要作用。然而，传统红外探测器受窄带隙半导体材料限制，面临两大瓶颈：一是为抑制严重热噪声常需深低温制冷，显著增加体积、功耗与成本；二是其灵敏度与响应速度通常不及成熟的硅基可见光探测器。

针对这一问题，非线性频率上转换技术提供了一种有效的解决途径。其核心物理过程是通过非线性光学效应（如倍频、和频、四波混频等），将入射的红外光子转换至可见光波段。这样，红外目标信息便可直接被高灵敏度、低成本且可在室温下工作的硅基CMOS或CCD相机捕捉。早期研究主要依赖体材料非线性晶体，但其相位匹配条件严格，限制了工作带宽与接收角，且系统体积大、难以集成。

近年来，随着微纳加工技术的发展，基于超表面（metasurfaces）的非线性光学调控成为了领域内的研究重点。超表面由亚波长尺度的纳米单元阵列组成，能够在极薄的物理厚度内实现对比度极高的电磁场局域增强，并打破传统体材料中的相位匹配限制。然而，超表面在非线性频率转换效率方面一直难以满足实用化需求。如何在微纳尺度下进一步增强光与物质的相互作用，利用高品质因子（Q因子）共振提升非线性转换效率，是目前红外成像技术向微型化、高性能迈进的关键科学问题。

本文亮点

针对提升超表面非线性转换效率的迫切需求，南昌大学信息工程学院研究团队以High-efficiency infrared upconversion imaging with nonlinear silicon metasurfaces empowered by quasi-bound states in the continuum 为题，于Opto-Electronic Advances 2026年第4期发表研究论文。该工作提出并实验验证了一种基于准连续域束缚态(quasi-bound states in the continuum, quasi-BIC)的硅基非线性超表面，实现了高效的红外上转换成像。

1. 精确的面内对称性破缺与quasi-BIC激发

该项研究的核心亮点在于对quasi-BIC的物理调控。研究团队在绝缘体上硅（SOI）平台上设计了由硅纳米圆盘与椭圆盘构成的二聚体单元（图1）。不同于传统的同时在多个方向引入扰动的设计，该工作通过精确控制椭圆盘在单方向（x轴）上的面内对称性破缺程度，将原本不与连续域辐射模耦合的BIC转化为具有有限寿命的quasi-BIC共振。这种单向扰动策略能够更有效地抑制辐射损耗

，实验测得该超表面在近红外波段表现出高Q因子的共振特性，其实验Q因子最高可达4000。

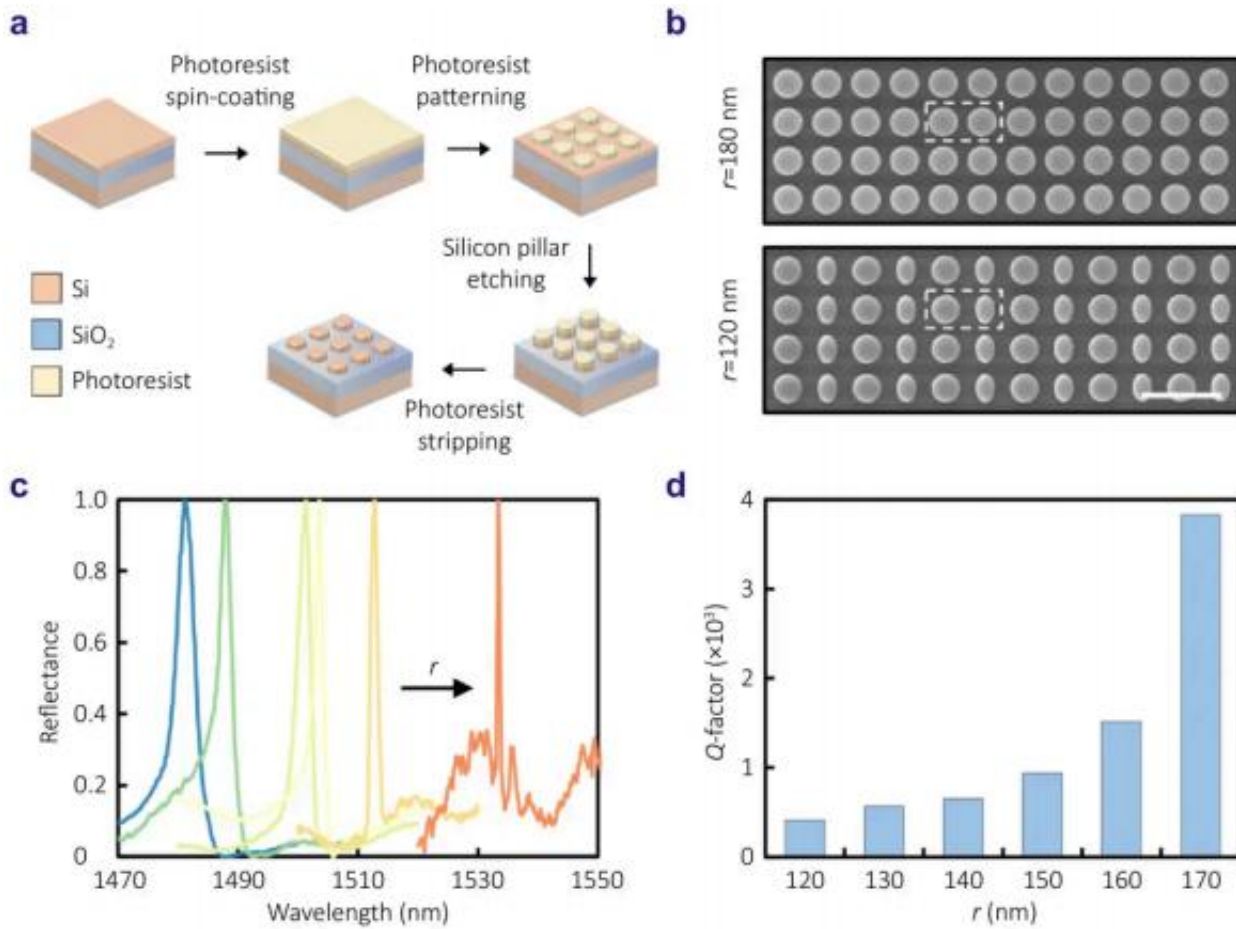


图 1 Quasi-BIC超表面的制备与线性光学响应实验测量。(a) 在 SOI 晶圆上进行纳米加工的工艺流程示意图。(b) 所制备超表面样品的俯视扫描电子显微镜 (SEM) 图像，分别为短轴 $r = 180$ nm (对称情况) 和 $r = 120$ nm (非对称情况)，比例尺为 $1 \mu\text{m}$ 。(c) 在 y 偏振光正入射下，短轴 r 从 120 nm 增加至 170 nm (图中光谱从左至右 r 逐渐增大) 时超表面的反射光谱。(d) 根据图 (c) 中反射光谱提取的在不同 r 取值下的 Q 因子

2. 极高的三倍频 (THG) 转换效率

得益于 quasi-BIC 共振引起的强局域场增强效应

，该超表面显著提升了硅材料的三阶非线性响应。实验结果表明 (图 2)，在中心波长为 1533 nm 的近红外飞秒脉冲泵浦下，超表面产生的可见光 THG (波长约 511 nm) 信号强度相比未图案化的平整硅膜提升了 650 倍以上。在 $10 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 的泵浦强度下，测得的绝对转换效率达到 3×10^{-5} 。这一性能不仅打破了此前硅基超表面在同类研究中的效率记录，也证明了利用高 Q 因子共振克服材料本征非线性系数限制的可行性。

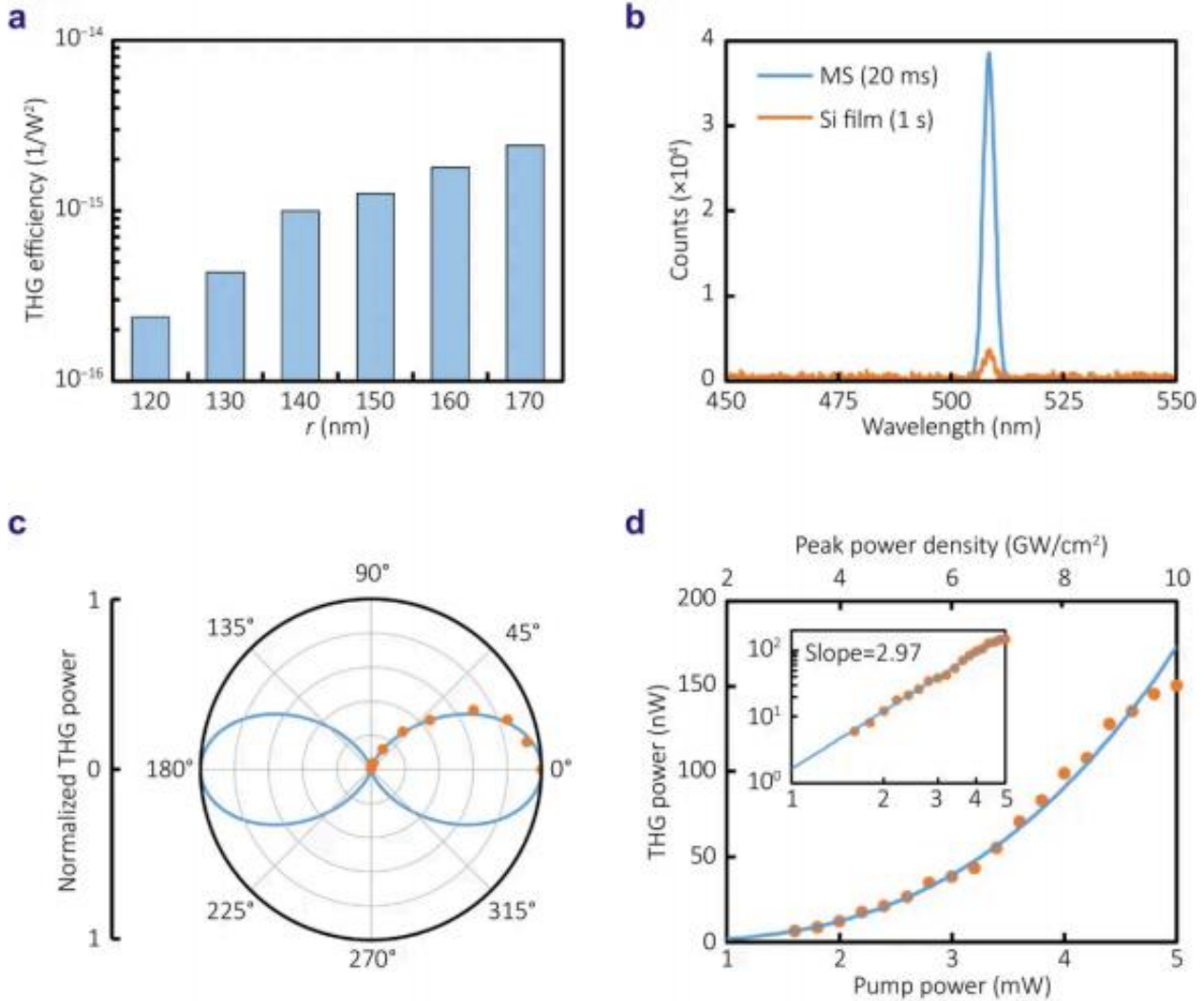


图2 Quasi-BIC 超表面的非线性光学响应测量。(a) 在y偏振入射下，短轴 r 范围在 120 nm 至 170 nm 之间的超表面归一化 THG 转换效率。(b) $r = 170$ nm 的超表面样品与未图案化硅薄膜的 THG 光谱对比。(c) $r = 170$ nm 的超表面在不同偏振角入射下的归一化 THG 功率分布图。(d) $r = 170$ nm 的超表面 THG 输出功率随泵浦功率的变化关系，插图为对数坐标下 THG 过程对泵浦功率的依赖关系（斜率验证）

3. 高保真、高空间分辨率的上转换成像表现

为验证该技术在红外成像领域的应用潜力，研究团队搭建了非线性上转换成像系统，对多种目标图案进行了演示（图3）。实验采用西门子星（Siemens star）分辨率靶标作为测试对象，结果显示，上转换后的可见光图像能够清晰地分辨靶标中心的细微条纹，其空间分辨率约为 $6 \mu\text{m}$ 。此外，该平台对复杂字符图案（如 NCU）也展现了良好的上转换保真度，图像轮廓清晰且具有较高的信噪比。

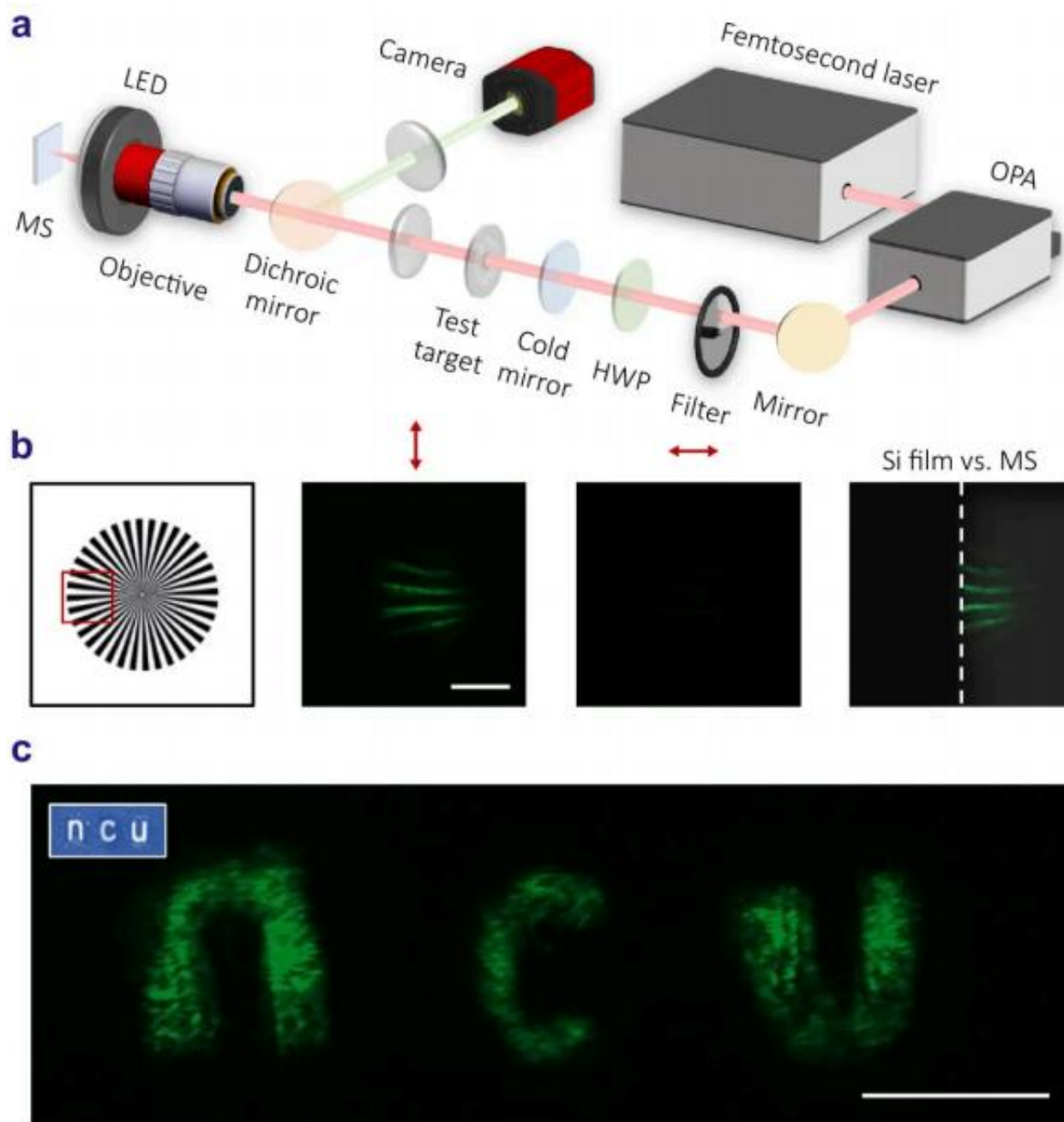


图 3 Quasi-BIC 超表面实现的红外上转换成像实验测量。(a) 用于非线性成像的自建实验光路系统示意图。(b) Siemens star分辨率靶标及其对应的可见光上转换图像，包括三种对比情况：y偏振入射下的超表面成像、x偏振入射下的超表面成像，以及在y偏振下未图案化硅膜与超表面区域的成像对比。(c) NCU 字母图案的上转换可见光实拍图，插图为对应的 3 D 打印目标板，比例尺为100 μm

总结与应用前景

该研究展示的非线性超表面具有完全的CMOS工艺兼容性，且基于成熟的SOI加工平台，具备大规模量产与集成的潜力。相比于传统的基于和频过程的成像方案，该方法仅需单束泵浦光即可实现THG转换，显著降低了系统的复杂性。这一成果不仅为研究强场环境下光与物质相互作用提供了新的物理平台，也为未来开发微型化、高性能、工作于室

温环境下的红外传感器及全光信息处理器件提供了重要的技术支撑。

该工作得到国家自然科学基金、江西省自然科学基金以及江西省科协青年科技人才托举项目的资助。此外，作者特别感谢英国诺丁汉特伦特大学徐雷教授、南开大学屈伦博士在非线性实验测量方面的指导与帮助。

作者简介



刘婷婷，博士，南昌大学特聘研究员。近年来从事信号处理与微纳光学的融合应用、亚波长光学器件光场调控等关键理论与技术研究，主持国家自然科学基金、江西省自然科学基金等多项课题，在光学期刊 Opto-Electronic Advances、Optica、Optics Letters、Optics Express、Journal of Lightwave Technology，物理学期刊 SCIENCE CHINA Physics, Mechanics Astronomy、Physical Review A/ B/Applied/Research、材料科学期刊 Nano Letters 等发表论文 80 余篇，被引用 4200 余次，h 因子 31。2024-2025 年连续 2 次入选斯坦福大学全球前 2% 顶尖科学家榜单，担任 Optics Letters 期刊编辑，Opto-Electronic Advances 期刊青年编委，以及多个国际期刊审稿人。



长按识别此二维码，直达全文
来源：光电期刊

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发